

学位論文の要旨

(学位論文題目)

EUVL 用マスクのパターン欠陥修正および位相欠陥の構造解析に関する研究

(論文提出者) 天野 剛

要旨

本論文は、Extreme Ultraviolet (EUV) リソグラフィ用マスクのパターン欠陥修正技術の開発および、位相欠陥の位置情報を正確にとらえる技術の開発について述べたものである。

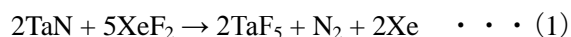
EUV マスクのパターン欠陥には、吸収層が余剰に形成された黒欠陥と、吸収層が欠落した白欠陥の 2 種類がある。本研究では、黒欠陥および白欠陥を修正する技術を開発し、回路パターンに欠陥があった場合でも、欠陥修正を施すことによって正常なパターンと同等な転写性能が得られる欠陥修正技術を開発することが目的である。

また、パターン欠陥の他に位相欠陥と分類される欠陥もある。位相欠陥は多層膜成膜前のクオーツ (Qz) 基板表面の凹凸が原因で、成膜した多層膜構造にも凹凸が伝搬することで形成される。位相欠陥箇所は EUV 反射強度が小さくなり、吸収層が無くてもウェハに暗部として転写される。そこで、暗部として転写される位相欠陥を吸収層パターンで覆い、位相欠陥を転写させない技術が検討されている。本研究では、位相欠陥を吸収層パターンで覆うために必要な、位相欠陥がウェハに転写される位置情報を正確にとらえる技術を開発することが目的である。

以下に各章の概要を説明する。

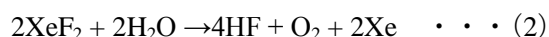
第 1 章では、従来の光リソグラフィとマスク技術開発の経緯と、EUV マスク技術開発に求められる課題について述べた。

第 2 章では、パターン欠陥を修正することで正常なパターンと同等な転写性能を得ることを目的とした、パターン欠陥修正技術に関して述べた。FIB (Focused Ion Beam) を用いた黒欠陥修正は、吸収層からなる欠陥部の加工速度を早く、多層膜を保護するバッファ層の加工速度を遅くすることで多層膜にダメージを発生させないことが重要である。そのため、吸収層からなる黒欠陥を選択的に加工できる加工促進ガスを導入しながら欠陥修正を行う。これを Gas Assisted Etching (GAE) という。これまでの技術では XeF_2 などの加工促進ガスのみを使用していたため、FIB 照射中止後も吸収層を構成する窒化タンタル層と XeF_2 が、反応式 (1) に示す自発的反応を進行するため、FIB を照射していない箇所もエッチングされ、黒欠陥部のみの加工は困難であった。



XeF_2 以外にフッ素を含む SF_6 、 NF_3 および ClF_3 を用いた GAE 評価を行ったが、欠陥修正

に必要な吸収層加工速度は得られなかった。そこで、欠陥部のエッチング終了後に XeF_2 を失活させることに着目して開発を行った。欠陥部のエッチング終了と同時に反応抑制ガスとして水蒸気を導入することで、反応式 (2) に示す余剰な XeF_2 を失活させ、黒欠陥部のみを加工することができた。



欠陥修正箇所の EUV 転写評価で欠陥修正箇所の転写特性は正常部と同等となることを確認した。以上の結果、FIB-GAE 技術を用いることで EUV マスクの黒欠陥修正が可能となった。

FIB を用いた白欠陥修正は、これまで欠陥部に堆積膜を形成することで行ってきた。EUV マスクは、転写時にマスク表面に付着する炭化水素膜を繰り返し洗浄除去する必要がある。このとき堆積膜の膜減りが発生し、修正箇所の転写性能が劣化することがわかった。

白欠陥とは吸収層パタンの欠落による不要な高反射部であるので、白欠陥部の多層膜を除去し低反射部とすることも白欠陥の修正となりうることに着目して修正技術の開発を行った。白欠陥部の多層膜を FIB で除去し、多層膜の断面形状を Transmission Electron Microscope (TEM) で観察したところ、側壁角度は 83 度、側壁部分は多層膜を形成する Mo、Si および照射した Ga の混合層が膜厚 15 nm で形成された。白欠陥修正箇所の EUV 転写評価を行ったところ、欠落した吸収層と同じ位置の多層膜を除去することで正常部と同等の転写性能が得られた。EUV マスクを繰り返し 5 回洗浄した後、白欠陥修正箇所を EUV 顕微鏡で観察したところ、白欠陥修正箇所の EUV 反射性能に異常は観られず、本技術で白欠陥修正を行った箇所は洗浄耐性を有することを確認した。

以上の黒欠陥および白欠陥の修正技術を組み合わせることで、欠陥修正箇所は正常なパターンと同等な転写性能が得られるようになった。

第 3 章では、吸収層からなる薄膜欠陥が転写性能に与える影響を求めることを目的とした、薄膜欠陥の作製、転写評価および EUV 顕微鏡観察評価について述べた。薄膜欠陥とは、EUV マスク製造工程中の吸収層パターンエッチング工程において、異物付着などにより、EUV マスクの吸収層が完全にエッチング除去されない欠陥である。これまで吸収層と同等な膜厚の欠陥に関する転写評価が複数報告されているが、薄膜欠陥に対する評価はほとんどない。そこで、本研究では種々の膜厚の薄膜欠陥を EUV マスクにつくりこみ、EUV 転写性能に与える影響を評価した。転写評価の結果、half pitch (hp) 225 nm (Lines and spaces) L/S 中に形成した膜厚 2.9 nm の薄膜欠陥であっても、ウェハに転写されることがわかった。EUV 縮小露光装置ではウェハに解像させることが困難な、hp 88 nm L/S 中に形成した薄膜欠陥を、ニュースバル BL-3 に接続した EUV 顕微鏡で観察した。観察の結果、hp 88 nm L/S 中に形成した 3.7 nm 膜厚の薄膜欠陥を、正常部の光強度と比較して 40% の光強度低下として観察することができた。これにより薄膜欠陥は、吸収層と同等な膜厚の黒欠陥と同じく、欠陥検査工程で検出し、修正する必要があることがわかった。また、EUV 顕微鏡は転写性能に影響

響を与える欠陥の観察手段となることがわかった。

第 4 章では、位相欠陥を吸収層パターンで覆い、転写されないようにすることを目的として、多層膜中を伝搬する位相欠陥の構造解析と位相欠陥の構造が転写位置に与える影響について述べた。位相欠陥が発生する主たる要因は、多層膜成膜前の Qz 基板を研磨する工程にある。研磨工程で Qz 基板表面の凹凸形状が完全に除去されずに多層膜を成膜すると、凹凸形状に応じた多層膜構造の乱れが形成される。これまで位相欠陥の断面構造は、Qz 基板表面の凹凸から基板面に垂直に多層膜中を伝搬していると考えられていたが、研究の結果、Qz 基板面から多層膜中を斜め方向に伝搬する位相欠陥があることが Transmission Electron Microscope (TEM) 観察によりわかった。本研究では、位相欠陥が斜めに伝搬した場合、ウェハ上に転写される位相欠陥の位置が移動することを明らかとし、移動量を考慮して位相欠陥を吸収層パターンで覆う必要性を示した。また、位相欠陥が多層膜中を伝搬する角度と方向に規則性があることがわかった。具体的には、基板表面の凹凸形状は多層膜中をマスク中心方向に傾いて伝搬し、伝搬する角度はマスク中心から基板表面の凹凸までの距離に依存することが TEM 観察によりわかった。マスク中心から 93 mm 離れた外周部では伝搬角度は 6 度に達した。また、伝搬角度と方向は基板表面の凹凸形状に依存しないこともわかった。伝搬角度が 1 度傾くことで実質的な位相欠陥の位置はマスク上で 0.9 nm シフトすることがシミュレーションにより示した。位相欠陥を吸収層パターンで覆い転写させないためには、位相欠陥検査工程で位相欠陥の位置を求める工程と、位相欠陥が伝搬する角度と方向を考慮に入れた実質的な位相欠陥の位置を特定し、吸収層パターンを配置すればよいことをシミュレーションにより示した。

研究の成果として、開発した黒欠陥、白欠陥修正手法および、位相欠陥の実質的な位置を特定する手法を組み合わせることで、回路パターンや基板に欠陥があった場合でも、欠陥の無いマスクと同等な転写性能を得る手法を開発することができた。